

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-006017

(43)Date of publication of application : 10.01.1997

(51)Int.Cl.

G03F 9/00  
G03F 9/02  
H01L 21/027

(21)Application number : 07-179370

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 22.06.1995

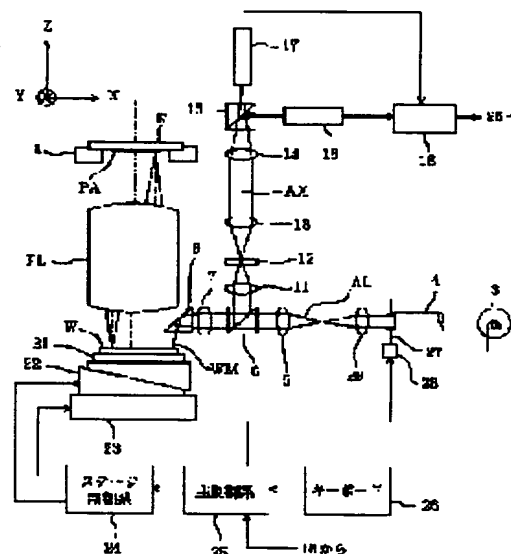
(72)Inventor : NAKAGAWA MASAHIRO  
SUGAYA AYAKO

## (54) ALIGNMENT DEVICE

## (57)Abstract:

**PURPOSE:** To obtain a device with which position detection with high accuracy is possible even for alignment marks having a low difference in level by detecting the position of the marks in accordance with the first position information of the mark image in a first defocusing state and the second position information of the mark image in a second defocusing state.

**CONSTITUTION:** The marks of the low difference in level having a height of, for example, several 10nm or below are commanded via a keyboard 26 in such a manner that the luminous flux for illumination regulated by a means 27 for regulating the opening state of illumination has the smallest possible illumination. The first position information of the mark image is detected in the first defocusing state in which the contrast higher than the best focusing state is obtainable. The second position information of the mark image is similarly detected in the second defocusing state in which the contrast higher than the contrast in the best focusing state is obtainable. As a result, the influence of the displacement of the telecentric property in accordance with the first and the second position information according to the first and the second defocusing state is corrected and the detection of the mark positions with the high accuracy is made possible.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

24.05.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

BEST AVAILABLE COPY

★NIKR

U11

97-122956/12

★JP 09006017-A

Alignment appts. for e.g. semiconductor wafer, liq. crystal display - has focus controller that controls focus state of detected mark image based on mark position detector which detects data position

NIKON CORP 95.06.22 95JP-179370

P84 S02 (97.01.10) G03F 9/00, 9/02, H01L 21/027

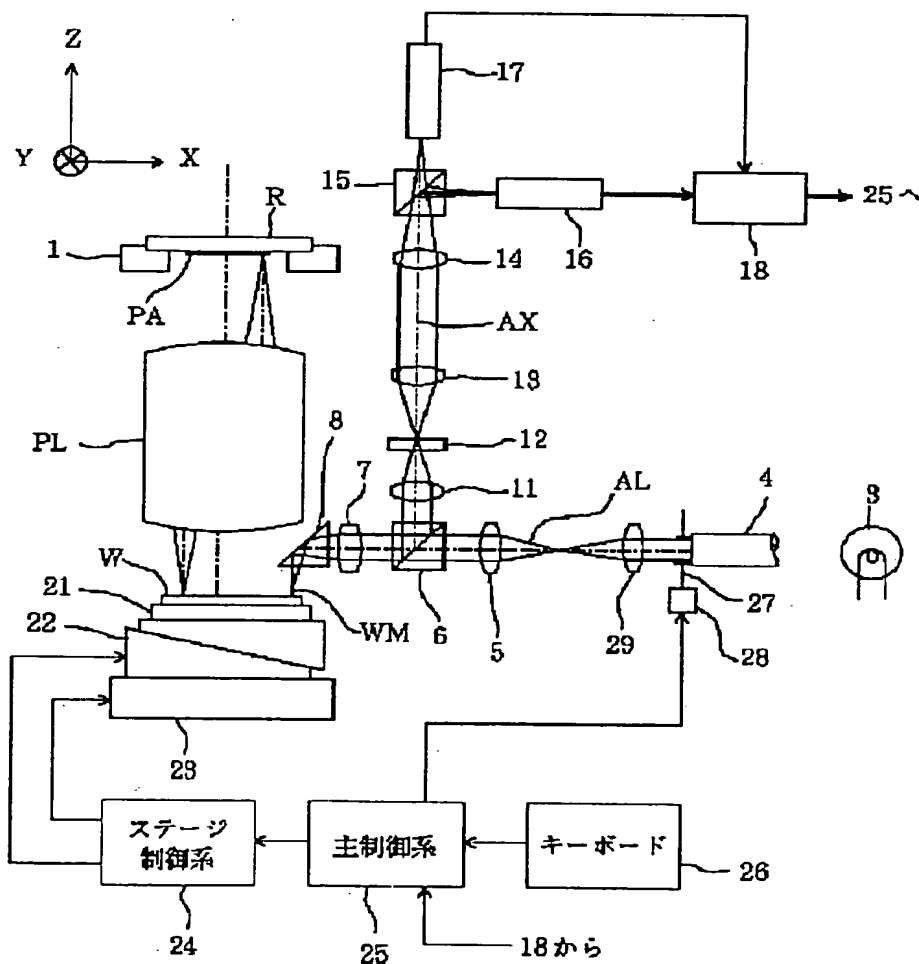
The appts. has an image formatting optical system that forms a mark image based on the reflection of light that is irradiated towards the mark of a substrate. A mark position detector detects the mark position based on first position data in the first defocus state of the mark image detected by an image detector.

A focus controller controls the focus state of the mark image. The first defocus state is based on a second defocus state of second position data.

ADVANTAGE - Provides high precision when detecting mark position. (12pp  
 Dwg.No.1/14)

N97-101245

U11-C04 U11-C04B2



Mc equivalent

Japanese Patent Application Laid-open No. 09-006017

**[Title of the Invention]**

Alignment Unit

5

**[0013]**

**[Preferred Embodiment of the Invention]** The embodiments of the present invention will be described based on the drawings attached hereto. Fig. 1 schematically illustrates a configuration of an alignment unit relating to a first embodiment of the present invention. Note that this embodiment is an example in which the present invention is applied to an alignment unit for projection exposure apparatus. In Fig. 1, a Z axis is set parallel with respect to an optical axis of a projection optical system PL of a projection exposure apparatus, an X axis is set in a direction parallel to a paper surface of Fig. 1 within a plane perpendicular to the optical axis, and a Y axis is set in a direction perpendicular to the Z axis and the X axis.

**[0014]** The projection exposure apparatus as shown comprises an illumination optical system for exposure (not shown) for uniformly illuminating a reticle R with appropriate exposure light. The reticle R is supported almost parallel to an XY plane on a reticle stage 1, and a circuit pattern to be transferred is formed on a pattern area PA of the reticle R. Light transmitted through the reticle R reaches a wafer (or glass plate ) W,

which is a photosensitive substrate, via the projection optical system PL, and a pattern image of the reticle R is formed on the wafer W.

**[0015]** Note that the wafer W is supported almost parallel to the XY plane on a Z stage 22 via a wafer holder 21. The Z stage 22 is configured to be driven along the optical axis of the projection optical system PL by a stage control system 24. Further, the Z stage 22 is supported on an XY stage 23. The XY stage 23 is configured to be driven two-dimensionally within the XY plane perpendicular to the optical axis of the projection optical system also by the stage control system 24.

**[0016]** When projection exposure is performed, it is necessary to perform optical positioning (alignment) to align the pattern area PA and each exposure area on the wafer W. Therefore, a position on a reference coordinate system of a step mark for alignment formed on the wafer W, i.e. a wafer mark WM is detected, and alignment is performed based on the positional information. Thus, in order to detect the position of the wafer mark WM and perform alignment, the alignment unit of the present invention is used. Note that the wafer mark WM may be two one-dimensional marks being independent of each other and having periodicity in an X direction and a Y direction respectively, or may be a two-dimensional mark having periodicity in the X direction and the Y direction.

**[0017]** The alignment unit of the first embodiment shown in Fig. 1 comprises a light source 3 such as a halogen

lamp to supply illumination light (alignment light AL). Light from the light source 3 is guided to a predetermined position via a light guide 4 such as optical fiber. Illumination light exited from an exit end of the light guide 4 is regulated by an illumination opening state regulating means 27 such as mechanical aperture diaphragm, then becomes an illumination beam having appropriate sectional shape and is incident on a condenser lens 29.

10 **[0018]** The alignment light AL having passed through the condenser lens 29 is once condensed, and then incident on an illumination relay lens 5 via an illumination field stop (not shown). The alignment light AL having become parallel light via the illumination relay lens 5 is  
15 incident on a first objective lens 7 after passing through a half prism 6. The alignment light AL condensed by the first objective lens 7 is reflected off a reflecting surface of a reflective prism 8 downward in the drawing, and then illuminates the wafer mark WM  
20 formed on the wafer W.

**[0019]** As have been described above, the light source 3, the light guide 4, the illumination opening state regulating means 27, the condenser lens 29, the illumination field stop (not shown), the illumination  
25 relay lens 5, the half prism 6, the first objective lens 7, and the reflective prism 8 make up an illumination optical system for irradiating the wafer mark WM with illumination light.

[0020] Out of the illumination light, the light reflected off the wafer mark WM is incident on the half prism 6 via the reflective prism 8 and the first objective lens 7. The light reflected off the half prism 6 upward in the drawing forms an image of the wafer mark WM onto an index plate 12 via a second objective lens 11. The light from this mark image is incident on an XY split half prism 15 via a relay lens system (13, 14). Then the light reflected off the XY split half prism 15 is incident on a CCD 16 for Y direction and the light transmitted through the XY split half prism 15 is incident on a CCD 17 for X direction.

[0021] As have been described above, the reflective prism 8, the first objective lens 7, the half prism 6, the second objective lens 11, the index plate 12, the relay lens system (13, 14), and the half prism 15 make up an imaging optical system for forming a mark image due to the light reflected off the wafer mark WM out of the illumination light. And, the CCD 16 for Y direction and the CCD 17 for X direction make up an image detecting means for detecting the mark image formed via the imaging optical system.

[0022] In the above manner, on an image pickup surface of the CCD 16 for Y direction and of the CCD 17 for X direction, a mark image is formed together with an index pattern image of the index plate 12. Output signals from the CCD 16 for Y direction and the CCD 17 for X direction are supplied to a signal processing system 18. Further,

positional information of the wafer mark WM obtained by signal processing (waveform processing) in the signal processing system 18 is supplied to a main control system 25.

5   **[0023]** The main control system 25 outputs a stage control signal to the stage control system 24, based on the positional information of the wafer mark WM from the signal processing system 18. The stage control system 24 appropriately drives the XY stage 23 according to the  
10 stage control signal, and performs alignment of the wafer W. Note that to the main control system 25, a setting instruction with respect to the illumination opening state regulating means 27 is supplied via an input means 26 such as a keyboard. The main control system 25 drives  
15 the illumination opening state regulating means 27 via a drive system 28 based on the setting instruction, and regulates an illumination opening state of the illumination light to a desirable state.

**[0024]** With respect to a step mark having an ordinary  
20 height, the instruction is supplied via the keyboard 26 so that the illumination beam regulated by the illumination opening state regulating means 27 has the greatest possible illumination  $\sigma$ . Also, on a wafer side focus plane of the first objective lens 7, i.e. on an  
25 object plane of the imaging optical system, the wafer mark WM is positioned. Thus, on an image pickup plane of the CCD 16 for Y direction and of the CCD 17 for X direction, a mark image is formed in a best focus state

(focused focal state). And, based on this mark image, a position of the wafer mark WM is detected using, for example, a method of EGA (Enhanced Global Alignment). Note that since the method of EGA is described in detail  
5 in the Japanese Patent Application Publication No. 61-044,429 and the Japanese Patent Application Publication No. 62-084,516, the details will be omitted in this description.

[0025] Meanwhile, with respect to a low step mark having  
10 a height, for example, not more than several tens nm, the instruction is supplied via the keyboard 26 so that the illumination beam regulated by the illumination opening state regulating means 27 has the smallest possible illumination  $\sigma$ . Also, from a wafer side focus plane of  
15 the first objective lens 7, i.e. from an object plane of the imaging optical system, the wafer mark WM is shifted a predetermined distance (a defocus amount) along the optical axis AX of the imaging optical system. In this case, on an image pickup plane of the CCD 16 for Y  
20 direction and of the CCD 17 for X direction, a mark image is formed in a defocus state.

[0026] Fig. 2 shows figures showing light intensity distributions of a mark image in a defocus state and in a best focus state with respect to a wafer mark WM having a  
25 low step. Note that (a) shows a cross section of the wafer mark WM having a low step. The wafer mark shown in the drawing is a periodic mark which is made up of a trough portion (S) and a peak portion (L) alternately



formed at a pitch  $P$ , for example, along an  $X$  direction.

[0027] Meanwhile, (b) shows a light intensity distribution of a mark image in a defocus state ( $Z=\Delta Z$ ), i.e. a rear focus state, in which the wafer mark WM is moved upward in Fig. 1 by  $\Delta Z$  from a focus plane along the optical axis AX. And, (c) shows a light intensity distribution of a mark image in a best focus state ( $Z=0$ ) in which the wafer mark WM is positioned on a focus plane. Further, (d) shows a light intensity distribution of a mark image in a defocus state ( $Z=-\Delta Z$ ), i.e. a front focus state, in which the wafer mark WM is moved downward in Fig. 1 by  $\Delta Z$  from a focus plane along the optical axis AX.

[0028] As shown in Fig. 2, with respect to a low step mark, contrast of a mark image in a best focus state ( $Z=0$ ) is low, and contrast of the mark image in a predetermined defocus state is maximum, as have been described in a section of [Operation] of the present invention. Thus, in the present embodiment, a position of the mark image having high contrast in a front focus state of  $Z=-\Delta Z$  is obtained as a first positional information. And, a position of the mark image having high contrast in a rear focus state of  $Z=\Delta Z$  is obtained as a second positional information.

[0029] Note that contrast of a mark image in the front focus state of  $Z=-\Delta Z$  and in the rear focus state of  $Z=\Delta Z$  does not need to be maximum. It is important in the present embodiment that contrast of a mark image in the front focus state of  $Z=-\Delta Z$  and in the rear focus state of

$Z=\Delta Z$  is substantially higher than contrast of a mark image in a best focus state.

[0030] Thus, based on a mean value of the first positional information and the second positional  
5 information obtained, a position of the wafer mark WM is detected. In this manner, by using the mean value, the influence of telecentric shift accompanying the front focus state of  $Z=-\Delta Z$  and the influence of telecentric shift accompanying the rear focus state of  $Z=\Delta Z$  are  
10 cancel out each other and a position of the wafer mark WM can be detected with high accuracy.

[0031] Note that it is not always necessary to move the wafer mark WM along the optical axis AX, in order to form a rear focus state and a front focus state as stated  
15 above. For example, a desirable defocus state can be formed also by moving the first objective lens 7 or the second objective lens 11 back and forth along the optical axis AX. In addition, by moving the relay lens system (13, 14) back and forth along the optical axis AX, a desirable  
20 defocus state may be formed. In this case, by integrally moving the index plate 12 and the relay lens system (13, 14), the index plate 12 and the relay lens 13, or the index plate 12 and the relay lens 14, contrast of an index pattern image on an image pickup plane of CCD is  
25 not affected by defocus.

[0032] Further, the image pickup planes of the CCD 16 for Y direction and the CCD 17 for X direction may be moved back and forth along the optical axis AX. Also, a

desirable defocus state may be formed by inserting and removing an optical member (i.e. a member for changing an optical path length) in an optical path of the imaging optical system, or by electrically changing a refractive index of the optical member disposed in the optical path of the imaging optical system. Further, as an illumination opening state suitable for detecting a low step mark, in addition to a method of making the illumination  $\sigma$  small, a method of forming a ring-shaped or quadrupole modified secondary light source is also available. In this case, a configuration is desirable in which a mechanical aperture diaphragm having a shape as shown in Fig. 3 can be automatically replaced on a pupil plane of the illumination optical system.

15 **[0033]** Fig. 4 illustrates a part of a configuration of an alignment unit related to a second embodiment of the present invention. Note that the alignment unit in the second embodiment has a similar configuration to the alignment unit of the first embodiment, and other parts  
20 than the configuration shown in Fig. 4 are same as the configuration in the first embodiment. In the second embodiment, an optical path is split by another half prism 45 disposed in the optical path between the lens 14 and the XY split half prism 15, and two image pickup  
25 detection systems are additionally disposed in a split optical path, which is basically different from the first embodiment. In Fig. 4, the same references are labeled to the elements having similar functions to the elements of

the first embodiment.

**[0034]** As in the foregoing description, in the alignment unit in Fig. 4, the half prism 45 is disposed in the optical path between the relay lens system (13, 14) and the XY split half prism 15, as a light dividing means. Therefore, light from a mark image which is incident on the half prism 45 via the relay lens system (13, 14) is divided into two. In other words, light transmitted through the half prism 45 is incident on a first XY split half prism 15. Then, light reflected off the first XY split half prism 15 is incident on a first CCD 16 for Y direction and light transmitted through the first XY split half prism 15 is incident on a first CCD 17 for X direction.

**[0035]** Meanwhile, light reflected off the half prism 45 in a left side direction of the drawing is incident on a second XY split half prism 15'. Then, light transmitted through the second XY split half prism 15' is incident on a second CCD 16' for Y direction, and light reflected off the second XY split half prism 15' is incident on a second CCD 17' for X direction. Note that, as shown in Fig. 4, the alignment unit comprises an optical path length correction member 46 which is switchably disposed in the optical path between the half prism 45 and the first XY split half prism 15, or in the optical path between the half prism 45 and the second XY split half prism 15'.

**[0036]** In other words, when detecting an ordinary step

mark, as shown in dash lines in the drawing, the optical path length correction member 46 is positioned in the optical path between the half prism 45 and the first XY split half prism 15. As a result, a mark image having high contrast is detected in a best focus state by both of the first CCD 16 for Y direction and the first CCD 17 for X direction, and also by the second CCD 16' for Y direction and the second CCD 17' for X direction. Therefore, for example, based on output signals from the first CCD 16 for Y direction and the first CCD 17 for X direction, not only a position of the wafer mark WM but also a position of the wafer W can be detected with high accuracy.

**[0037]** Meanwhile, when detecting a low step mark, as shown in full lines in the drawing, the optical path length correction member 46 is positioned in the optical path between the half prism 45 and the second XY split half prism 15'. As a result, a mark image having high contrast is detected respectively in a front focus state by the first CCD 16 for Y direction and the first CCD 17 for X direction, and in a rear focus state by the second CCD 16' for Y direction and the second CCD 17' for X direction. Note that it is needless to say that the wafer mark WM is located on a focus plane of the first objective lens in both cases when detecting the ordinary step mark and when detecting the low step mark.

**[0038]** In this manner, in the second embodiment, when the low step mark is detected, the so-called front focus

state and rear state are formed simultaneously, and thereby a mark image having high contrast in each defocus state can be detected simultaneously. Therefore, based on a mean value of the first positional information of a mark image in a front focus state and the second positional information of a mark image in a rear focus state, a position of the wafer mark WM can be detected. Namely, the influence of telecentric shift accompanying defocus is corrected, and thereby a position of the wafer mark WM can be accurately and speedily detected.

**[0039]** Fig. 5 schematically illustrates a part of a configuration of an alignment unit related to a third embodiment of the present invention. Note that the alignment unit in the third embodiment has a similar configuration to the alignment unit of the first embodiment, and other parts than the configuration shown in Fig. 5 are same as the configuration in the first embodiment. In the third embodiment, when detecting a low step mark, an afocal system 50 made up of uniaxial crystal such as calcite is inserted in an optical path of an imaging optical system, instead of driving the Z stage 22 or the like, which is basically different from the first embodiment. In Fig. 5, the same references are labeled to the elements that have similar functions to the elements of the first embodiment.

**[0040]** As have been described above, the alignment unit in Fig. 5, the afocal system 50 is disposed in a parallel optical path between a first objective lens 7 and a half

prism 6. The afocal system 50 is an afocal system of almost equal magnification which is made up of a combination of a positive lens 50a and a negative lens 50b arranged in order from a wafer side. Fig. 6 illustrates a direction of an optic axis of each lens making up the afocal system of Fig. 5. In Fig. 6, (a) shows a direction of an optic axis of the positive lens 50a, and (b) shows a direction of an optic axis of the negative lens 50b, respectively.

10 **[0041]** As shown in Fig. 6(a), the optic axis of the positive lens 50a is an "a" axis intersecting the optical axis AX and rotating 45 degrees in an anticlockwise direction in the drawing from an X axis within an XY plane perpendicular to the optical axis AX (parallel to a  
15 Z axis). On the other hand, the optic axis of the negative lens 50b is a "b" axis intersecting the optical axis AX and rotating 45 degrees in a clockwise direction in the drawing from the X axis within an XY plane perpendicular to the optical axis AX. In this manner, the  
20 directions of the optic axes of the respective lenses making up the afocal system 50 are orthogonal to each other, and are tilt 45 degrees with respect to the X direction and Y direction respectively, which are measurement directions.

25 **[0042]** In the case of uniaxial negative crystal such as calcite, a refractive index  $N_o$  with respect to a normal wave is higher than a refractive index  $N_e$  with respect to an abnormal wave. Therefore, as shown in Fig. 7(a), with

respect to a normal wave "o" which polarized light direction is perpendicular to a paper surface of the drawing and perpendicular to an optic axis of the positive lens 50a (the "a" axis) at the time of being incident on the positive lens 50a, the afocal system 50 as a whole has a positive refractive power. And, a mark image is formed by the normal wave "o" on the index plate 12 in a so-called front focus state. On the other hand, as shown in Fig. 7(b), with respect to an abnormal wave "e" which polarized light direction is perpendicular to a paper surface of the drawing and parallel to the optic axis of the positive lens 50a (the "a" axis) at the time of being incident on the positive lens 50a, the afocal system 50 as a whole has a negative refractive power. And, a mark image is formed by the abnormal wave "e" on the index plate 12 in a so-called rear focus state.

**[0043]** However, if nothing is done, as described later, a mark image in a front focus state and a mark image in a rear focus state will overlap and cancel out each other on the index plate 12, and only a mixed image having low contrast can be obtained. For the reason, in a third embodiment, by arranging an afocal system 50 eccentrically from the optical axis AX, a mark image in a front focus state and a mark image in a rear focus state are lost touch with each other along an eccentric direction. Fig. 8 shows that by arranging the afocal system 50 eccentrically from the optical axis AX, a mark image in a front focus state and a mark image in a rear



focus state are lost touch with each other along the "a" axis as an eccentric direction.

[0044] As shown in Fig. 8, when arranging the entire afocal system 50 eccentrically from the optical axis AX upward in the drawing along the "a" axis which is the optic axis of the positive lens 50a, the normal wave "o" and the abnormal wave "e" exit the afocal system 50 in an angle deflected in directions opposite to each other with respect to the optical axis AX. As a result, on the index plate 12, a mark image formed by the normal wave "o" in a front focus state and a mark image formed by the abnormal wave "e" in a rear focus state are lost touch with each other in a direction perpendicular to the optical axis AX, i.e. along the "a" axis. Fig. 9(a) and (b) shows that a mark image formed by the normal wave "o" in a front focus state and a mark image formed by the abnormal wave "e" in a rear focus state are shifted respectively on the index plates 12 due to eccentricity of the afocal system 50 along the "a" axis.

[0045] As is shown in full lines in the Fig. 9(a), when the afocal system 50 is not arranged eccentrically with respect to the optical axis AX, a mark image by the normal wave "o" in a front focus state is formed almost symmetrically with respect to the X and Y axes. Note that in Fig. 9(a) shaded portions correspond to a peak of an image in a front focus state of a step mark, and blank portions in between the shaded portions correspond to a trough portion of the image in a front focus state.

Meanwhile, as is shown in full lines in the Fig. 9(b), when the afocal system 50 is not arranged eccentrically with respect to the optical axis AX, a mark image by the abnormal wave "e" in a rear focus state is also formed almost symmetrically with respect to the X and Y axes. Note that in Fig. 9(b) shaded portions correspond to a peak of an image in a rear focus state of a step mark, and blank portions in between the shaded portions correspond to a trough portion of the image in a rear focus state.

[0046] As can be seen when referring to Figs. 9(a) and (b), in a state when the afocal system 50 is not arranged eccentrically with respect to the optical axis AX, a mark image in a front focus state and a mark image in a rear focus state overlap and cancel out each other on the index plate 12, and only a mixed image having low contrast can be obtained. In this case, two mark images can be lost touch with each other by  $\sqrt{2}/2$  times of a pitch P on the index palte 12 by appropriately setting an eccentricity along the "a" axis of the afocal system 50.

[0047] In other words, as shown in dash lines in Fig. 9(a), a mark image by the normal wave "o" in a front focus state is moved by  $P/(2\sqrt{2})$  obliquely in an upper right direction along the "a" axis. And, as shown in dash lines in Fig. 9(b), a mark image by the abnormal wave "e" in a rear focus state is moved by  $P/(2\sqrt{2})$  obliquely in a lower left direction along the "a" axis. As a result, on the index plate 12, each peak and trough of the mark

image by the normal wave "o" in a front focus state and each peak and trough of the mark image by the abnormal wave "e" in a rear focus state almost overlap respectively with respect to the X axis direction which is a measurement direction. In Fig. 9, the case is exemplified when a wafer mark WM is a one-dimensional mark for X measurement, however, if an eccentric state of the afocal system 50 is maintained, the same effects are obtained for a one-dimensional mark for Y measurement and a two-dimensional mark commonly used for X and Y measurements. In this manner, not only on the index plate 12 but also on an image pickup plane, a mixed image having high contrast of a mark image in a front focus state and a mark image in a rear focus state is formed. Note that in Figs. 8 and 9, an eccentric direction of the afocal system 50 is an "a" axis direction, however, the eccentric direction of the afocal system 50 may be a "b" axis direction, and further may be directions other than the "a" and "b" axes directions.

[0048] In this manner, also in the third embodiment, upon detection of a low step mark, by forming so-called front focus state and rear focus state simultaneously, a mark image having high contrast in each defocus state can be detected simultaneously. Therefore, based on a mean value of the first positional information of a mark image in a front focus state and the second positional information of a mark image in a rear focus state, a position of the wafer mark WM can be detected. Namely, by correcting the

influence of telecentric shift accompanying defocus, a position of the wafer mark WM can be detected with high accuracy and high speed. Note that it is needless to say that a wafer mark WM is located on a focus plane of the first objective lens in the third embodiment also.

[0049] In the above first to third embodiments, with respect to a low step mark which can be regarded as a phase pattern, contrast of a mark image obtained in a best focus state ( $Z=0$ ) is lowest. However, in the case when a reflectivity at a trough portion (S) of the step mark is different from a reflectivity at a peak portion (L) of the step mark due to the influence of a resist layer or the like, contrast of a mark image in a best focus state is not always lowest. For example, in the case when a reflectivity NS of a trough portion (S) and a reflectivity NL of a peak portion (L) of the step mark are greatly different, even for a low step mark, light intensity distribution similar to that for a bright/dark pattern can be obtained, and thereby a mark image having high contrast can obtained.

[0050] In addition, in the case when the reflectivity NS of the trough portion (S) and the reflectivity NL of the peak portion (L) of the step mark are slightly different, as shown in Fig. 10, a changing mode of a light intensity difference  $\Delta I$  (a difference between the maximum light intensity  $I_{\max}$  and the minimum light intensity  $I_{\min}$ ) of a mark image due to focus variation is not symmetry in a best focus state ( $Z=0$ ). In other words, as shown in Fig.

11, a light intensity difference  $\Delta I_c$  of a mark image in a defocus state of  $Z=-\Delta Z$  is sometimes smaller than a light intensity difference  $\Delta I_b$  in a best focus state ( $Z=0$ ).

[0051] In addition, a light intensity difference  $\Delta I_a$  of a mark image in a defocus state of  $Z=\Delta Z$  and a light intensity difference  $\Delta I_c$  of a mark image in a defocus state of  $Z=-\Delta Z$  are sometimes not equal. Therefore, as in the first to third embodiments, when making a defocus amount corresponding to a front focus state equal to a defocus amount corresponding to a rear focus state, as shown in Fig. 11(c), a position detection of a mark image in a front focus state becomes impossible at times.

[0052] For the reason, in a fourth embodiment of the present invention, as shown in Fig. 10, a defocus amount  $Z_0$  with which a light intensity difference is a minimum value  $\Delta I_{\min}$  is used as an offset. Namely, as shown in Fig. 12, a first defocus amount  $Z_1$  and a second defocus amount  $Z_2$  are defined as in the below equations (4) and (5) respectively.

$$Z_1 = -\Delta Z + Z_0 \quad (4)$$

$$Z_2 = \Delta Z + Z_0 \quad (5)$$

[0053] Further, based on a position  $X_1$  of a mark image in a state of the first defocus amount  $Z_1$  and a position  $X_2$  of a mark image in a state of the second defocus amount  $Z_2$ , a position  $X_0$  of a mark image in a best focus state is obtained by the interpolation method. In this manner, based on the position  $X_0$ , a mark position for which the influence of telecentric shift accompanying defocus is

corrected can be detected with high accuracy. Note that since a defocus amount  $Z_0$  with which a light intensity difference  $\Delta I$  is minimum depends on illumination  $\sigma$ , a mark pitch  $P$ , a duty ratio and the like in addition to a  
 5 reflectivity difference between a trough portion (S) and a peak portion (L) of the low step mark, in order to perform position measurement with respect to a mark image having maximum contrast for each mark, it is necessary to actually measure change of the light intensity difference  
 10  $\Delta I$  in each defocus state in advance and obtain the defocus amount  $Z_0$  based on the measurement results.

**[0054]** In Fig. 12, the first defocus amount  $Z_1$  and the second defocus amount  $Z_2$  are defined symmetry with respect to the defocus amount  $Z_0$ . However, as shown in  
 15 Fig. 13, the first defocus amount  $Z_1$  and the second defocus amount  $Z_2$  can be defined asymmetry with respect to the defocus amount  $Z_0$ . When referring to Fig. 11, it can be seen that contrast of a mark image in a rear focus state of  $Z=\Delta Z$  is higher than contrast of a mark image in  
 20 a front focus state of  $Z=-\Delta Z$ . So, as shown in Fig. 13, it is also possible to define the first defocus amount  $Z_1$  as  $\Delta Z$  and the second defocus amount  $Z_2$  as  $\Delta Z+Z'$ .

**[0055]** In this manner, as shown in Fig. 13, two defocus states of  $Z=Z_1$  and  $Z=Z_2$  are formed. And, based on the  
 25 position  $X_1$  of a mark image in a state of the first defocus amount  $Z_1$  and the position  $X_2$  of a mark image in a state of the second defocus amount  $Z_2$ , the position  $X_0$  of a mark image in a best focus state is obtained by the

extrapolation method. In this manner, based on the position  $X_0$ , a mark position for which the influence of telecentric shift accompanying defocus is corrected can be detected with high accuracy.

5   **[0056]** Note that in the fourth embodiment, in the case when employing the image detection method as in the first embodiment, first the Z stage 22 is moved until a defocus amount becomes the first defocus amount  $Z_1$ , and next the Z stage 22 is moved until a defocus amount becomes the  
10 second defocus amount  $Z_2$ . Then, based on a mark image formed on an image pickup plane of CCD in each defocus state, a position of a mark can be accurately detected.

**[0057]** Meanwhile, in the fourth embodiment, in the case when employing the image detection method as in the  
15 second or third embodiment, a state in which the Z stage 22 is moved until a defocus amount becomes  $(Z_1+Z_2)/2$  is regarded as an initial state. And, making the initial state as a standard, two desirable defocus states are foremd according to each embodiment. Then, based on a  
20 mark image formed on an image pickup plane of CCD in each defocus state, a position of a mark can be accurately detected.

**[0058]** Note that in the fourth embodiment, when the influence of telecentric shift is small enough to be  
25 ignored, it is possible, as a matter of course, to select a mark image having higher contrast out of mark images in the first defocus state ( $Z=Z_1$ ) and the second defocus state ( $Z=Z_2$ ), and perform position detection of a mark

based on only the mark image having higher contrast.





## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 アライメントすべき基板上に形成されたマークに照明光を照射するための照明光学系と、前記照明光に対する前記マークからの反射光に基づいてマーク像を形成するための結像光学系と、前記マーク像を検出するための像検出手段と、該像検出手段で検出された前記マーク像の位置情報に基づいて前記マークの位置を検出するためのマーク位置検出手段とを備えたアライメント装置において、

前記像検出手段で検出される前記マーク像のフォーカス状態を制御するためのフォーカス制御手段をさらに備え、

前記マーク位置検出手段は、第 1 のデフォーカス状態における前記マーク像の第 1 位置情報と、前記第 1 のデフォーカス状態とは実質的に異なる第 2 のデフォーカス状態における前記マーク像の第 2 位置情報とに基づいて、前記マークの位置を検出することを特徴とするアライメント装置。

【請求項 2】 前記アライメント装置は、前記マークとして低段差マークを検出するものであって、前記第 1 および第 2 のデフォーカス状態におけるマーク像のコントラストは、ベストフォーカス状態におけるマーク像のコントラストよりも実質的に大きいことを特徴とする請求項 1 に記載のアライメント装置。

【請求項 3】 前記照明光の照明開口状態を規定するための照明開口状態規定手段をさらに備え、前記照明開口状態規定手段は、前記マークの形状および反射率特性に応じて前記照明光の照明開口状態を規定し、

前記フォーカス制御手段は、前記マークの形状および反射率特性に応じて前記第 1 のデフォーカス状態および前記第 2 のデフォーカス状態を規定することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のアライメント装置。

【請求項 4】 前記フォーカス制御手段は、前記結像光学系の光軸に沿って前記基板を移動させることによって、前記第 1 のデフォーカス状態および前記第 2 のデフォーカス状態を形成することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のアライメント装置。

【請求項 5】 前記フォーカス制御手段は、前記結像光学系中において屈折力を有する少なくとも 1 つの光学部材を前記結像光学系の光軸に沿って移動させることによって、前記第 1 のデフォーカス状態および前記第 2 のデフォーカス状態を形成することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のアライメント装置。

【請求項 6】 前記フォーカス制御手段は、前記像検出手段の像検出面を前記結像光学系の光軸に沿って移動させることによって、前記第 1 のデフォーカス状態および前記第 2 のデフォーカス状態を形成することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のアライメント装置。

【請求項 7】 前記結像光学系は、前記マークからの反射光を 2 つに分割するための光分割手段を有し、該光分割手段を介した一方の光に基づいて第 1 のマーク像を形成し、前記光分割手段を介した他方の光に基づいて第 2 のマーク像を形成し、

前記像検出手段は、前記第 1 のマーク像を検出するための第 1 像検出手段と、前記第 2 のマーク像を検出するための第 2 像検出手段とを有し、

前記フォーカス制御手段は、

前記第 1 像検出手段と前記光分割手段との間の第 1 光路と前記第 2 像検出手段と前記光分割手段との間の第 2 光路との間において切り換え可能な光路長補正部材を有し、

前記第 1 像検出手段および前記第 2 像検出手段において前記第 1 のマーク像および前記第 2 のマーク像をそれぞれベストフォーカス状態で検出するために、前記第 1 光路中に前記光路長補正部材を介在させ、

前記第 1 像検出手段において前記第 1 のマーク像を前記第 1 のデフォーカス状態で検出し且つ前記第 2 像検出手段において前記第 2 のマーク像を前記第 2 のデフォーカス状態で検出するために、前記第 2 光路中に前記光路長補正部材を介在させることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のアライメント装置。

【請求項 8】 前記フォーカス制御手段は、

1 軸性結晶からなり且つ前記結像光学系の光軸に対して垂直な第 1 方向に沿って光学軸を有する正レンズ成分と、1 軸性結晶からなり且つ前記結像光学系の光軸に対して垂直な面において前記第 1 方向と直交する第 2 方向に沿って光学軸を有する負レンズ成分とを有するアフォーカル系を前記結像光学系の光路中に備え、

前記マークからの反射光のうち入射側のレンズ成分に対する異常波に基づいて第 1 デフォーカス状態の第 1 のマーク像を形成し、前記マークからの反射光のうち前記入射側のレンズ成分に対する正常波に基づいて第 2 デフォーカス状態の第 2 のマーク像を形成し、前記アフォーカル系を前記結像光学系の光軸に対して一体的に偏心させることによって、前記第 1 のマーク像と前記第 2 のマーク像とを該偏心方向に沿って乖離させることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載のアライメント装置。

【請求項 9】 前記アライメント装置は、第 1 マークと第 2 マークとの重ね合わせ測定を行うものであって、前記像検出手段は、前記像検出面上において前記マーク像のフォーカス状態に依存することのない基準位置を有し、

前記マーク位置検出手段は、

前記第 1 マークに対して、前記基準位置に対する前記第 1 のデフォーカス状態におけるマーク像に関する第 1 位置情報と前記基準位置に対する前記第 2 のデフォーカス状態におけるマーク像に関する第 2 位置情報とに基づい

て、前記第 1 マークの相対位置を検出し、  
前記第 2 マークに対して、前記基準位置に対するベストフォーカス状態におけるマーク像に関する第 3 位置情報に基づいて、前記第 2 マークの相対位置を検出し、  
前記第 1 マークの相対位置と前記第 2 マークの相対位置とに基づいて、前記第 1 マークと前記第 2 マークとの重ね合わせ測定を行うことを特徴とする請求項 1 に記載のアライメント装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明はアライメント装置に関し、特に半導体ウエハや液晶ディスプレイ用プレート等の基板に形成されたアライメントマークの位置を検出して、基板のアライメント（位置合わせ）を行うアライメント装置に関する。

【0002】

【従来の技術】半導体素子や液晶表示素子などを製造するための投影露光装置には、感光性基板としてのウエハ（またはガラスプレート等）に形成されたマークの位置を検出し、その位置情報に基づいて基板のアライメントを行うアライメント装置が組み込まれている。従来のこの種のアライメント装置として、たとえば特開平 4 - 6 5 6 0 3 号公報や特開平 4 - 2 7 3 2 4 6 号公報等に表示されているように、いわゆる撮像方式のアライメント装置が知られている。

【0003】上述の公報等に表示された従来の撮像方式のアライメント装置では、アライメントすべき基板上の所定位置に形成されたアライメントマークを照明し、その反射光に基づいてアライメントマークの像を結像光学系を介して形成する。そして、形成された像の画像情報に基づいて、具体的には画像信号を波形処理することにより、アライメントマークの中心位置をひいては基板の位置を検出する。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述のような従来のアライメント装置では、アライメントマークが低段差マークである場合、結像光学系を介して形成

$$\theta = \lambda / P$$

ここで、たとえば段差マークを結像光学系の光軸に沿って  $\Delta Z$  だけ移動させてマーク像のデフォーカス状態を形成したとき、段差マークからの 0 次光（正反射光）と一

$$\Delta W = \theta^2 \Delta Z / 2 = \lambda^2 \Delta Z / (2 P^2)$$

【0009】位相差顕微鏡の原理から明らかなように、結像光学系を介して形成されるマーク像のコントラストが最大になる条件は、0 次光と一次回折光との位相ずれ

$$\Delta Z = P^2 / (2 \lambda^2)$$

【0010】なお、形成されるマーク像の光量を充分確保するためには、照明光の照明  $\sigma$ （ウエハ上での結像開口数に対する照明開口数の比）がある程度大きくインコヒーレント照明に近い方が良い。しかしながら、所定以

されるマーク像のコントラストは低い。その結果、アライメントマークの位置検出を、ひいては基板のアライメントを高精度に行うことができないという不都合があった。

【0005】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、低段差のアライメントマークに対しても高精度な位置検出が可能なアライメント装置を提供することを目的とする。

【0006】

10 【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明においては、アライメントすべき基板上に形成されたマークに照明光を照射するための照明光学系と、前記照明光に対する前記マークからの反射光に基づいてマーク像を形成するための結像光学系と、前記マーク像を検出するための像検出手段と、該像検出手段で検出された前記マーク像の位置情報に基づいて前記マークの位置を検出するためのマーク位置検出手段とを備えたアライメント装置において、前記像検出手段で検出される前記マーク像のフォーカス状態を制御するためのフォーカス制御手段をさらに備え、前記マーク位置検出手段は、第 1 のデフォーカス状態における前記マーク像の第 1 位置情報と、前記第 1 のデフォーカス状態とは実質的に異なる第 2 のデフォーカス状態における前記マーク像の第 2 位置情報とに基づいて、前記マークの位置を検出することを特徴とするアライメント装置を提供する。

20 【0007】本発明の好ましい態様によれば、前記アライメント装置は、前記マークとして低段差マークを検出するものであって、前記第 1 および第 2 のデフォーカス状態におけるマーク像のコントラストは、ベストフォーカス状態におけるマーク像のコントラストよりも実質的に大きい。

【0008】

【作用】所定方向に沿ってピッチ  $P$  で周期的に形成された段差マークを波長  $\lambda$  の照明光で照明する場合、段差マークからの一次回折光の回折角  $\theta$  は、次の式（1）で表される。

（1）

次回折光との位相ずれ  $\Delta W$  は、次の式（2）で表される。

（2）

$\Delta W$  が  $\lambda / 4$  になることである。すなわち、デフォーカス量  $\Delta Z$  が次の式（3）に示す関係を満たすときに、マーク像のコントラストが最大になる。

（3）

上の照射角度を有する照明光でマークを照射すると、得られる 0 次光および一次回折光に対して上述の最大コントラストのための位相条件は成立しなくなり、コントラストの低いマーク像しか得られなくなってしまう。した

がって、低段差マークの形状や反射率特性に応じて、照明開口状態およびデフォーカス量を適当に設定する必要がある。

【0011】通常、段差マークのピッチPは数 $\mu\text{m}$ であるから、最大コントラストのマーク像を得るには、数十 $\mu\text{m}$ のデフォーカス量 $\Delta Z$ が必要となる。しかしながら、たとえばマークを結像光学系の光軸に対して移動させてデフォーカス状態を形成する際、光学系の調整状態およびマークの非対称性等によるテレセントリック性のずれ（結像光学系の光軸に対するマークからの反射光の傾き）があると、デフォーカスに伴いマーク像の位置ずれが発生する。すなわち、マーク像のコントラストが高くなるようにデフォーカス状態を形成しても、このデフォーカス状態におけるマーク像の位置情報に対してテレセントリック性のずれの影響を補正しなければ、マーク像の位置情報だけに基づいて求められたマーク位置には検出誤差が発生する。

【0012】そこで、本発明では、たとえば低段差マークに対して、ベストフォーカス状態よりも高いコントラストが得られる第1のデフォーカス状態においてマーク像の第1位置情報を検出する。また、同じくベストフォーカス状態よりも高いコントラストが得られる第2のデフォーカス状態においてマーク像の第2位置情報を検出する。こうして、本発明によれば、互いに異なる2つのデフォーカス状態におけるマーク像の第1位置情報と第2位置情報とに基づき、第1のデフォーカス状態および第2のデフォーカス状態に伴うテレセントリック性のずれの影響を補正して、マークの位置を高精度に検出することができる。

#### 【0013】

【実施例】以下、本発明の実施例を、添付図面に基づいて説明する。図1は、本発明の第1実施例にかかるアライメント装置の構成を概略的に示す図である。なお、本実施例は、投影露光装置用のアライメント装置に本発明を適用した例である。図1では、投影露光装置の投影光学系PLの光軸に対して平行にZ軸が、光軸に垂直な平面内において図1の紙面に平行な方向にX軸が、Z軸およびX軸に垂直な方向にY軸がそれぞれ設定されている。

【0014】図示の投影露光装置は、適当な露光光でレチクルRを均一に照明するための露光用照明光学系（不図示）を備えている。レチクルRはレチクルステージ1上においてXY平面とほぼ平行に支持されており、そのパターン領域PAには転写すべき回路パターンが形成されている。レチクルRを透過した光は、投影光学系PLを介して感光基板であるウエハ（またはガラスプレート）Wに達し、ウエハW上にはレチクルRのパターン像が形成される。

【0015】なお、ウエハWは、ウエハホルダ21を介してZステージ22上においてXY平面とほぼ平行に支

持されている。Zステージ22は、ステージ制御系24によって、投影光学系PLの光軸に沿って駆動されるようになっている。Zステージ22はさらに、XYステージ23上に支持されている。XYステージ23は、同じくステージ制御系24によって、投影光学系PLの光軸に対して垂直なXY平面内において二次元的に駆動されるようになっている。

【0016】投影露光の際には、パターン領域PAとウエハW上の各露光領域とを光学的に位置合わせ（アライメント）する必要がある。そこで、ウエハW上に形成されたアライメント用の段差マークすなわちウエハマークWMの基準座標系における位置を検出し、その位置情報に基づいてアライメントが行われる。このように、ウエハマークWMの位置を検出してアライメントを行うのに、本発明のアライメント装置が使用される。なお、ウエハマークWMは、X方向およびY方向にそれぞれ周期性を有する互いに独立した2つの一次元マークであってもよいし、X方向およびY方向に周期性を有する二次元マークであってもよい。

【0017】図1に示す第1実施例のアライメント装置は、照明光（アライメント光AL）を供給するために、たとえばハロゲンランプのような光源3を備えている。光源3からの光は、たとえば光ファイバーのようなライトガイド4を介して所定位置まで導かれる。ライトガイド4の射出端から射出された照明光は、メカ絞り等の照明開口状態規定手段27で制限された後、適当な断面形状を有する照明光束となってコンデンサーレンズ29に入射する。

【0018】コンデンサーレンズ29を介したアライメント光ALは、一旦集光された後、照明視野絞り（不図示）を介して照明リレーレンズ5に入射する。照明リレーレンズ5を介して平行光となったアライメント光ALは、ハーフプリズム6を透過した後、第1対物レンズ7に入射する。第1対物レンズ7で集光されたアライメント光ALは、反射プリズム8の反射面で図中下方に反射された後、ウエハW上に形成されたウエハマークWMを照明する。

【0019】このように、光源3、ライトガイド4、照明開口状態規定手段27、コンデンサーレンズ29、照明視野絞り（不図示）、照明リレーレンズ5、ハーフプリズム6、第1対物レンズ7、および反射プリズム8は、ウエハマークWMに照明光を照射するための照明光学系を構成している。

【0020】照明光に対するウエハマークWMからの反射光は、反射プリズム8および第1対物レンズ7を介して、ハーフプリズム6に入射する。ハーフプリズム6で図中上方に反射された光は、第2対物レンズ11を介して、指標板12上にウエハマークWMの像を形成する。このマーク像からの光は、リレーレンズ系（13、14）を介して、XY分岐ハーフプリズム15に入射す

る。そして、XY分岐ハーフプリズム15で反射された光はY方向用CCD16に、XY分岐ハーフプリズム15を透過した光はX方向用CCD17に入射する。

【0021】このように、反射プリズム8、第1対物レンズ7、ハーフプリズム6、第2対物レンズ11、指標板12、リレーレンズ系(13, 14)およびハーフプリズム15は、照明光に対するウエハマークWMからの反射光に基づいてマーク像を形成するための結像光学系を構成している。また、Y方向用CCD16およびX方向用CCD17は、結像光学系を介して形成されたマーク像を検出するための像検出手段を構成している。

【0022】こうして、Y方向用CCD16およびX方向用CCD17の撮像面には、マーク像が指標板12の指標パターン像とともに形成される。Y方向用CCD16およびX方向用CCD17からの出力信号は、信号処理系18に供給される。さらに、信号処理系18において信号処理(波形処理)により得られたウエハマークWMの位置情報は、主制御系25に供給される。

【0023】主制御系25は、信号処理系18からのウエハマークWMの位置情報に基づいて、ステージ制御信号をステージ制御系24に出力する。ステージ制御系24は、ステージ制御信号にしたがってXYステージ23を適宜駆動し、ウエハWのアライメントを行う。なお、主制御系25には、たとえばキーボードのような入力手段26を介して、照明開口状態規定手段27に対する設定指令が供給される。主制御系25は、この設定指令に基づき、駆動系28を介して照明開口状態規定手段27を駆動し、照明光の照明開口状態を所望の状態に規定する。

【0024】通常の高さを有する段差マークに対しては、照明開口状態規定手段27により規定される照明光束ができるだけ大きな照明 $\sigma$ を有するように、キーボード26を介して指令する。また、第1対物レンズ7のウエハ側焦点面にすなわち結像光学系の物体面にウエハマークWMを位置決めする。こうして、Y方向用CCD16およびX方向用CCD17の撮像面には、マーク像がベストフォーカス状態(合焦状態)で形成される。そして、このマーク像に基づいて、たとえばEGA(エンハンスド グローバル アライメント)の手法によりウエハマークWMの位置検出を行う。なお、EGAの手法については、特開昭61-44429号公報や特開昭62-84516号公報に詳述されているので、本明細書における詳細な説明を省略する。

【0025】一方、たとえば数十nm以下の高さを有する低段差マークに対しては、照明開口状態規定手段27により規定される照明光束ができるだけ小さな照明 $\sigma$ を有するように、キーボード26を介して指令する。また、第1対物レンズ7のウエハ側焦点面すなわち結像光学系の物体面から結像光学系の光軸AXに沿って所定距離(デフォーカス量)だけウエハマークWMを位置ずれ

させる。この場合、Y方向用CCD16およびX方向用CCD17の撮像面には、マーク像がデフォーカス状態で形成される。

【0026】図2は、低段差ウエハマークWMに対するデフォーカス状態およびベストフォーカス状態におけるマーク像の光強度分布を示す図である。なお、(a)は低段差ウエハマークWMの断面を示している。図示のウエハマークWMは、たとえばX方向に沿ってピッチPで交互に形成された谷部分(S)と山部分(L)とからなる周期性マークである。

【0027】一方、(b)は、ウエハマークWMが光軸AXに沿って焦点面から $\Delta Z$ だけ図1中上方に移動したデフォーカス状態( $Z = \Delta Z$ )すなわち後ピン状態におけるマーク像の光強度分布を示している。また、(c)は、ウエハマークWMが焦点面に位置決めされたベストフォーカス状態( $Z = 0$ )におけるマーク像の光強度分布を示している。さらに、(d)は、ウエハマークWMが光軸AXに沿って焦点面から $\Delta Z$ だけ図1中下方に移動したデフォーカス状態( $Z = -\Delta Z$ )すなわち前ピン状態におけるマーク像の光強度分布を示している。

【0028】図2に示すように、低段差マークに対しては、ベストフォーカス状態( $Z = 0$ )におけるマーク像のコントラストは低く、本発明の作用で説明したように所定のデフォーカス状態においてマーク像のコントラストは最大になる。そこで、本実施例では、 $Z = -\Delta Z$ の前ピン状態におけるコントラストの高いマーク像の位置を第1位置情報として求める。また、 $Z = \Delta Z$ の後ピン状態におけるコントラストの高いマーク像の位置を第2位置情報として求める。

【0029】なお、 $Z = -\Delta Z$ の前ピン状態および $Z = \Delta Z$ の後ピン状態におけるマーク像のコントラストは最大である必要はない。本実施例において重要なことは、 $Z = -\Delta Z$ の前ピン状態および $Z = \Delta Z$ の後ピン状態におけるマーク像のコントラストがベストフォーカス状態におけるマーク像のコントラストよりも実質的に高いことである。

【0030】こうして、得られた第1位置情報と第2位置情報との平均値に基づいて、ウエハマークWMの位置を検出する。このように、平均値をとることにより、 $Z = -\Delta Z$ の前ピン状態に伴うテレセントリック性のずれの影響と $Z = \Delta Z$ の後ピン状態に伴うテレセントリック性のずれの影響とを相殺して、ウエハマークWMの位置を高精度に検出することができる。

【0031】なお、上述のような後ピン状態および前ピン状態を形成するのに、必ずしもウエハマークWMを光軸AXに沿って移動させる必要はない。たとえば、第1対物レンズ7や第2対物レンズ11を光軸AXに沿って前後に移動させても、所望のデフォーカス状態を形成することができる。また、リレーレンズ系(13, 14)を光軸AXに沿って前後に移動させて、所望のデフォー

カス状態を形成してもよい。この場合、指標板 1 2 とリレーレンズ系 ( 1 3 , 1 4 ) とを一体的に、あるいは指標板 1 2 とリレーレンズ 1 3 または指標板 1 2 とリレーレンズ 1 4 とを一体的に移動させれば、CCD の撮像面において指標パターン像のコントラストがデフォーカスの影響を受けることがない。

【 0 0 3 2 】さらに、Y 方向用 CCD 1 6 および X 方向用 CCD 1 7 の撮像面を光軸 A X に沿って前後に移動させてもよい。また、結像光学系の光路中に光学部材 ( すなわち光路長を変化させる部材 ) を挿脱したり、あるいは結像光学系の光路中に配置された光学部材の屈折率を電氣的に変化させて、所望のデフォーカス状態を形成するようにしてもよい。また、低段差マークの検出に適した照明開口状態としては、照明  $\sigma$  を小さくする方法以外に、輪帯状や四つ目状の変形二次光源を形成する方法もある。この場合、照明光学系の瞳面において、図 3 に示すような形状のメカ絞りを自動的に交換することができるように構成すればよい。

【 0 0 3 3 】図 4 は、本発明の第 2 実施例にかかるアライメント装置の構成の一部を概略的に示す図である。なお、第 2 実施例のアライメント装置は第 1 実施例のアライメント装置と類似の構成を有し、図 4 に示す構成以外の部分は第 1 実施例の構成と同じである。第 2 実施例では、レンズ 1 4 と X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 との間の光路中に配置されたもう 1 つのハーフプリズム 4 5 により光路を分岐し、分岐された光路中に撮像検出系を 2 軸追加している点が第 1 実施例と基本的に異なる。図 4 において、第 1 実施例の要素と同様の機能を有する要素には、同じ参照符号を付している。

【 0 0 3 4 】上述したように、図 4 のアライメント装置では、リレーレンズ系 ( 1 3 , 1 4 ) と X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 との間の光路中に光分割手段としてハーフプリズム 4 5 が配置されている。したがって、リレーレンズ系 ( 1 3 , 1 4 ) を介してハーフプリズム 4 5 に入射したマーク像からの光は、2 つに分割される。すなわち、ハーフプリズム 4 5 を透過した光は、第 1 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 に入射する。そして、第 1 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 で反射された光は第 1 の Y 方向用 CCD 1 6 に、第 1 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 を透過した光は第 1 の X 方向用 CCD 1 7 に入射する。

【 0 0 3 5 】一方、ハーフプリズム 4 5 で図中左側に反射された光は、第 2 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 ' に入射する。そして、第 2 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 ' を透過した光は第 2 の Y 方向用 CCD 1 6 ' に、第 2 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 ' で反射された光は第 2 の X 方向用 CCD 1 7 ' に入射する。なお、第 2 実施例では、図 4 の示すように、ハーフプリズム 4 5 と第 1 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 との間の光路中と、ハーフプリズム 4 5 と第 2 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 ' との間の光路中との間で切り換え可能な光路長補正部材

4 6 を備えている。

【 0 0 3 6 】すなわち、通常の段差マークを検出する際は、図中破線で示すように、光路長補正部材 4 6 はハーフプリズム 4 5 と第 1 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 との間の光路中に位置決めされる。その結果、第 1 の Y 方向用 CCD 1 6 および第 1 の X 方向用 CCD 1 7 においても、第 2 の Y 方向用 CCD 1 6 ' および第 2 の X 方向用 CCD 1 7 ' においても、コントラストの高いマーク像がベストフォーカス状態で検出される。したがって、たとえば第 1 の Y 方向用 CCD 1 6 および第 1 の X 方向用 CCD 1 7 からの出力信号に基づいて、ウエハマーク WM の位置をひいてはウエハ W の位置を高精度に検出することができる。

【 0 0 3 7 】一方、低段差マークを検出する際は、図中実線で示すように、光路長補正部材 4 6 はハーフプリズム 4 5 と第 2 の X Y 分岐ハーフプリズム 1 5 ' との間の光路中に位置決めされる。その結果、第 1 の Y 方向用 CCD 1 6 および第 1 の X 方向用 CCD 1 7 においては前ピン状態で、第 2 の Y 方向用 CCD 1 6 ' および第 2 の X 方向用 CCD 1 7 ' においては後ピン状態で、それぞれコントラストの高いマーク像が検出される。なお、通常の段差マークを検出する際にも、低段差マークを検出する際にも、ウエハマーク WM が第 1 対物レンズの焦点面にあることはいうまでもない。

【 0 0 3 8 】このように、第 2 実施例では、低段差マークの検出に際して、いわゆる前ピン状態と後ピン状態とを同時に形成し、各デフォーカス状態におけるコントラストの高いマーク像を同時に検出することができる。したがって、前ピン状態におけるマーク像の第 1 位置情報と後ピン状態におけるマーク像の第 2 位置情報との平均値に基づいて、ウエハマーク WM の位置を検出することができる。すなわち、デフォーカスに伴うテレセントリック性のずれの影響を補正して、ウエハマーク WM の位置を高精度且つ迅速に検出することができる。

【 0 0 3 9 】図 5 は、本発明の第 3 実施例にかかるアライメント装置の構成の一部を概略的に示す図である。なお、第 3 実施例のアライメント装置は第 1 実施例のアライメント装置と類似の構成を有し、図 5 に示す構成以外の部分は第 1 実施例の構成と同じである。第 3 実施例では、低段差マークを検出する際に 2 ステージ 2 2 等を駆動する代わりに結像光学系の光路中に方解石などの 1 軸性結晶からなるアフォーカル系 5 0 を挿入する点が第 1 実施例と基本的に異なる。図 5 において、第 1 実施例の要素と同様の機能を有する要素には、同じ参照符号を付している。

【 0 0 4 0 】上述したように、図 5 のアライメント装置では、第 1 対物レンズ 7 とハーフプリズム 6 との平行光路中に、アフォーカル系 5 0 が配置されている。アフォーカル系 5 0 は、ウエハ側から順に、正レンズ 5 0 a と負レンズ 5 0 b との組み合わせからなるほぼ等倍のアフ

フォーカル系である。図6は、図5のアフォーカル系50を構成する各レンズの光学軸の方向について説明する図である。図6において、(a)は正レンズ50aの光学軸の方向を、(b)は負レンズ50bの光学軸の方向をそれぞれ示している。

【0041】図6(a)に示すように、正レンズ50aの光学軸は、光軸AX(Z軸に平行)に対して垂直なXY平面内において光軸AXを通りX軸から図中反時計回りに45°だけ回転したa軸である。一方、負レンズ50bの光学軸は、光軸AXに対して垂直なXY平面内において光軸AXを通りX軸から図中時計回りに45°だけ回転したb軸である。このように、アフォーカル系50を構成する各レンズの光学軸の方向は互いに直交し、計測方向であるX方向およびY方向に対してそれぞれ45°だけ傾いている。

【0042】方解石などの1軸性の負結晶の場合、正常波に対する屈折率Noは異常波に対する屈折率Neよりも大きい。したがって、図7(a)に示すように、正レンズ50aに入射する際の偏光方向が紙面に垂直で正レンズ50aの光学軸(a軸)に対して垂直である正常波oに対してアフォーカル系50全体は正屈折力を有し、指標板12上において正常波oにより形成されるマーク像はいわゆる前ピン状態となる。逆に、図7(b)に示すように、正レンズ50aに入射する際の偏光方向が紙面に垂直で正レンズ50aの光学軸(a軸)に対して平行である異常波eに対してアフォーカル系50全体は負屈折力を有し、指標板12上において異常波eにより形成されるマーク像はいわゆる後ピン状態となる。

【0043】しかしながら、このままでは、後述するように、指標板12上において、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とが重なり合って互いに打ち消し、コントラストの低い合成像しか得られないことになる。そこで、第3実施例では、アフォーカル系50を光軸AXから偏心させて、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とを偏心方向に沿って乖離させる。図8は、a軸方向に沿ってアフォーカル系50を光軸AXから偏心させて、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とを偏心方向であるa軸方向に沿って乖離させる様子を示す図である。

【0044】図8に示すように、正レンズ50aの光学軸であるa軸方向に沿ってアフォーカル系50全体を光軸AXから図中上方に偏心させると、正常波oと異常波eとは光軸AXに関して互いに反対方向に偏向された角度でアフォーカル系50を射出する。その結果、指標板12上において、正常波oによる前ピン状態のマーク像と異常波eによる後ピン状態のマーク像とが光軸AXに対して垂直方向に、すなわちa軸方向に沿って乖離する。図9(a)および(b)は、アフォーカル系50のa軸方向に沿った偏心により、正常波oによる前ピン状態のマーク像および異常波eによる後ピン状態のマーク

像がそれぞれ指標板12上においてシフトする様子を示す図である。

【0045】図9(a)において実線で示すように、アフォーカル系50を光軸AXに対して偏心させない場合、正常波oによる前ピン状態のマーク像がX軸およびY軸に関してほぼ対称に形成される。なお、図9(a)において、実線斜線部は段差マークの前ピン像の山に対応し、実線斜線部の中間にある白地は前ピン像の谷に対応している。一方、図9(b)において実線で示すように、アフォーカル系50を光軸AXに対して偏心させない場合、異常波eによる後ピン状態のマーク像もX軸およびY軸に関して対称に形成される。なお、図9(b)において、実線斜線部は、段差マークの後ピン像の山に対応し、実線斜線部の中間にある白地は後ピン像の谷に対応している。

【0046】図9(a)および(b)を参照すると、アフォーカル系50を光軸AXに対して偏心させない状態では、指標板12上において、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とが重なり合って互いに打ち消し、コントラストの低い合成像しか得られないことになることがわかる。ここで、アフォーカル系50のa軸に沿った偏心量を適当に設定することにより、指標板12上において2つのマーク像をそのピッチpの $\sqrt{2}/2$ 倍だけ乖離させることができる。

【0047】すなわち、図9(a)において破線で示すように、正常波oによる前ピン状態のマーク像がa軸に沿って斜め右上方向に $p/(2\sqrt{2})$ だけ移動する。また、図9(b)において破線で示すように、異常波eによる後ピン状態のマーク像がa軸に沿って斜め左下方向に $p/(2\sqrt{2})$ だけ移動する。その結果、指標板12上において、正常波oによる前ピン状態のマーク像と異常波eによる後ピン状態のマーク像との間で各々の山と山、谷と谷とが計測方向であるX軸方向に関してほぼ重なり合うことになる。図9では、ウェハマークWMがX計測用の1次元マークの場合を例示しているが、アフォーカル系50の偏心状態をこのままにしてY計測用の1次元マークやXY共用の2次元マークに対しても同様の作用がある。こうして、指標板12上において、ひいては撮像面上において、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とのコントラストの高い合成像が形成される。なお、図8および図9において、アフォーカル系50の偏心方向をa軸方向としているが、アフォーカル系50の偏心方向はb軸方向でもよいし、さらにa軸およびb軸以外の方向であってもよい。

【0048】このように、第3実施例においても、低段差マークの検出に際して、いわゆる前ピン状態と後ピン状態とを同時に形成し、各デフォーカス状態におけるコントラストの高いマーク像を同時に検出することができる。したがって、前ピン状態におけるマーク像の第1位置情報と後ピン状態におけるマーク像の第2位置情報と

の平均値に基づいて、ウェハマークWMの位置を検出することができる。すなわち、デフォーカスに伴うテレセントリック性のずれの影響を補正して、ウェハマークWMの位置を高精度且つ迅速に検出することができる。なお、第3実施例においても、ウェハマークWMが第1対物レンズの焦点面にあることはいうまでもない。

【0049】上述の第1実施例乃至第3実施例では、位相パターンとみなせる低段差マークに対して、ベストフォーカス時 ( $Z=0$ ) に得られるマーク像のコントラストが最も低いものとしている。しかしながら、レジスト層の影響等により、段差マークの谷部分 (S) と山部分 (L) とで反射率が異なる場合、ベストフォーカス状態のマーク像のコントラストが最も低くなるとは限らない。たとえば、段差マークの谷部分 (S) の反射率NSと山部分 (L) の反射率NL とが大きく異なる場合には、低段差マークであっても明暗パターンと同様の光強度分布が得られ、コントラストの高いマーク像が得られる。

【0050】また、段差マークの谷部分 (S) の反射率NSと山部分 (L) の反射率NL とが僅かに異なる低段差マークの場合には、図10に示すように、マーク像の

$$Z1 = -\Delta Z + Z0$$

$$Z2 = \Delta Z + Z0$$

【0053】そして、第1のデフォーカス量Z1の状態におけるマーク像の位置X1と、第2のデフォーカス量Z2の状態におけるマーク像の位置X2とに基づいて、内挿の手法によりベストフォーカス状態におけるマーク像の位置X0を求める。こうして、位置X0に基づいて、デフォーカスに伴うテレセントリック性のずれの影響を補正したマーク位置を高精度に検出することができる。なお、光強度差 $\Delta I$ が最小となるデフォーカス量Z0は、低段差マークの谷部分 (S) と山部分 (L) との反射率差の他、照明 $\sigma$ 、マークピッチP、デューティー比等に依存するので、各マークについて最大コントラストのマーク像にて位置計測するためには各デフォーカス状態における光強度差 $\Delta I$ の変化をあらかじめ実際に測定し、その結果に基づいてデフォーカス量Z0を求める必要がある。

【0054】図12では、第1デフォーカス量Z1および第2デフォーカス量Z2をデフォーカス量Z0に関して対称に規定している。しかしながら、図13に示すように、第1デフォーカス量Z1および第2デフォーカス量Z2をデフォーカス量Z0に関して非対称に規定することもできる。図11を参照すると、 $Z=-\Delta Z$ の前ピン状態よりも $Z=\Delta Z$ の後ピン状態の方がマーク像のコントラストが高いことがわかる。そこで、図13に示すように、第1デフォーカス量Z1を $\Delta Z$ とし、第2デフォーカス量Z2を $\Delta Z + Z'$ とすることもできる。

【0055】こうして、図13に示すように、 $Z=Z1$ および $Z=Z2$ の2つのデフォーカス状態を形成する。

光強度差 $\Delta I$  (最大の光強度 $I_{max}$ と最小の光強度 $I_{min}$ との差) のフォーカス変動に伴う変化の様態がベストフォーカス時 ( $Z=0$ ) に関して対称にはならない。すなわち、図11に示すように、ベストフォーカス時 ( $Z=0$ ) におけるマーク像の光強度差 $\Delta I_b$ よりも、 $Z=-\Delta Z$ のデフォーカス状態におけるマーク像の光強度差 $\Delta I_c$ が小さくなることもある。

【0051】また、 $Z=\Delta Z$ のデフォーカス状態におけるマーク像の光強度差 $\Delta I_a$ と、 $Z=-\Delta Z$ のデフォーカス状態におけるマーク像の光強度差 $\Delta I_c$ とが等しくなることがある。したがって、第1実施例乃至第3実施例のように前ピン状態に相当するデフォーカス量と後ピン状態に相当するデフォーカス量とを等しくすると、図11(c)に示すように、前ピン状態においてマーク像の位置検出が不可能になる場合がある。

【0052】そこで、本発明の第4実施例では、図10に示すように、光強度差が最小の値 $\Delta I_{min}$ になるデフォーカス量Z0をオフセットとして用いる。すなわち、図12に示すように、第1のデフォーカス量Z1および第2のデフォーカス量Z2を、それぞれ以下の式(4)および(5)のように規定する。

$$(4)$$

$$(5)$$

そして、第1のデフォーカス量Z1の状態におけるマーク像の位置X1と、第2のデフォーカス量Z2の状態におけるマーク像の位置X2とに基づいて、外挿の手法によりベストフォーカス状態におけるマーク像の位置X0を求める。こうして、位置X0に基づいて、デフォーカスに伴うテレセントリック性のずれの影響を補正したマーク位置を高精度に検出することができる。

【0056】なお、第4実施例において、第1実施例のような像検出方式を採用する場合には、まずデフォーカス量が第1デフォーカス量Z1になるまでZステージ22を移動させ、次にデフォーカス量が第2デフォーカス量Z2になるまでZステージ22を移動させる。そして、CCDの撮像面に形成される各デフォーカス状態におけるマーク像に基づいて、マークの位置を高精度に検出することができる。

【0057】一方、第4実施例において、第2実施例または第3実施例のような像検出方式を採用する場合には、デフォーカス量が $(Z1 + Z2) / 2$ になるまでZステージ22を移動させた状態を初期状態とする。そして、この初期状態を基準とした上で、各実施例に従って2つの所望のデフォーカス状態を形成する。そして、CCDの撮像面に形成される各デフォーカス状態におけるマーク像に基づいて、マークの位置を高精度に検出することができる。

【0058】なお、第4実施例において、テレセントリック性のずれの影響が無視し得る程度であれば、第1デフォーカス状態 ( $Z=Z1$ ) および第2デフォーカス状



態 ( $Z = Z2$ ) のうちマーク像のコントラストの高い方を選択し、コントラストの高い方のデフォーカス状態におけるマーク像だけに基いてマークの位置検出を行っても良いことはいうまでもない。

【0059】重ね露光に際しては、いわゆる重ね合わせ測定を行う。すなわち、ファースト露光によるマークを主尺 (X) とし、セカンド露光によるマークを副尺

(x) とし、主尺に対する副尺の位置ずれ ( $x - X$ ) を測定する。ここで、主尺が低段差マークである場合、上述の第1実施例乃至第4実施例にしたがって主尺の位置 (X) をデフォーカスに伴うテレセントリック性のずれの影響を補正して高精度に検出することができる。

【0060】しかしながら、副尺がレジストのような実質的に明暗パターンとみなせるマークである場合には、上述の第1実施例乃至第4実施例にしたがって、デフォーカス状態を形成すると副尺のマーク像がぼやけてしまい、副尺の位置 (x) を正確に求めることができなくなる。すなわち、図14の (b) に示すように、 $Z = 0$  のベストフォーカス状態では図中中央の主尺の像のコントラストが低く、図中両側の副尺の像のコントラストが高い。一方、図14の (a) および (c) に示すように、 $Z = Z1$  および  $Z = Z2$  のデフォーカス状態では図中中央の主尺の像のコントラストが高く、図中両側の副尺の像のコントラストが低くなってしまふ。

【0061】そこで、本発明の第5実施例を第1実施例に適用する場合、マーク像のフォーカス状態に依存することなく、常に撮像検出系の撮像面において指標パターン像が常にベストフォーカス状態で形成されるように構成する。そして、この指標像の位置 (S) に対する主尺の相対位置 (X) および副尺の相対位置 (x) を求め、その差分 ( $x - X$ ) を測定する。このような指標パターン像を形成するための指標板は、撮像素子である CCD の撮像面とはほぼ共役な面に位置決めされたパターン板であっても、撮像面に直接形成された基準ラインであってもよい。

【0062】まず、主尺の位置検出に際しては、指標パターン像の位置 (S) に対する主尺の相対位置 (X) を第1デフォーカス状態 ( $Z = Z1$ ) および第2デフォーカス状態 ( $Z = Z2$ ) で求め ( $X1$ ,  $X2$ )、主尺のマーク位置  $X0$  ( $= (X1 + X2) / 2$ ) を求める。一方、副尺の位置検出に際しては、指標像の位置 (S) に対する副尺の相対位置 (x) として、ベストフォーカス状態 ( $Z = 0$ ) における副尺のマーク位置  $x0$  を求める。こうして、求める重ね合わせの値として上記2つの計測値の差分 ( $x0 - X0$ ) を高精度に計測することができる。

【0063】なお、上述の第5実施例では、主尺の位置検出をする際に、 $X1$  と  $X2$  との平均化を行っている。しかしながら、第4実施例のように、 $X1$  と  $X2$  とに基いて内挿や外挿を行う手法も有効である。また、上述

の第5実施例では、主尺が低段差マークで副尺が明暗パターンとみなせるマークであるとしている。しかしながら、主尺が明暗パターンとみなせるマークで副尺が低段差マークとみなせる場合には、主尺をベストフォーカス状態で副尺をデフォーカス状態で計測すればよい。

【0064】なお、上述の各実施例では、本発明のアライメント装置を投影露光装置に適用した例を示したが、アライメントすべき基板上に形成されたマーク、特に低段差マークの位置検出に対して本発明を一般的に適用することが可能である。また、上述の第3実施例では、ウェハ側から順に、正レンズと負レンズとからなるアフォーカル系を用いた例を示しているが、負レンズと正レンズとからなるアフォーカル系を用いてもよいことは明らかである。

【0065】

【効果】以上説明したように、本発明によれば、低段差のアライメントマークに対しても、高いコントラストを有するマーク像に基いて、高精度な位置検出が可能なアライメント装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施例にかかるアライメント装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】低段差ウェハマーク WM に対するデフォーカス状態およびベストフォーカス状態におけるマーク像の光強度分布を示す図である。

【図3】輪帯状や四つ目状の変形二次光源を形成するためのメカ絞りの構成を示す図である。

【図4】本発明の第2実施例にかかるアライメント装置の構成の一部を概略的に示す図である。

【図5】本発明の第3実施例にかかるアライメント装置の構成の一部を概略的に示す図である。

【図6】図5のアフォーカル系 50 を構成する各レンズの光学軸の方向について説明する図である。

【図7】図5のアフォーカル系 50 の作用により、前ピン状態のマーク像および後ピン状態のマーク像が形成される様子を示す図である。

【図8】a 軸方向に沿ってアフォーカル系 50 を光軸 AX から偏心させて、前ピン状態のマーク像と後ピン状態のマーク像とを乖離させる様子を示す図である。

【図9】アフォーカル系 50 の偏心により、正常波 o による前ピン状態のマーク像および異常波 e による後ピン状態のマーク像がそれぞれ指標板 12 上においてシフトする様子を示す図である。

【図10】マーク像の光強度差  $\Delta I$  がベストフォーカス時 ( $Z = 0$ ) に関して対称にはならない例を示す図である。

【図11】各フォーカス状態におけるマーク像の光強度分布の例を示す図である。

【図12】 $Z = 0$  に対して非対称に、第1のデフォーカス量  $Z1$  および第2のデフォーカス量  $Z2$  を設定した例

17

を示す図である。

【図13】  $Z=0$  に対して非対称に、第1のデフォーカス量  $Z1$  および第2のデフォーカス量  $Z2$  を設定したもう1つの例を示す図である。

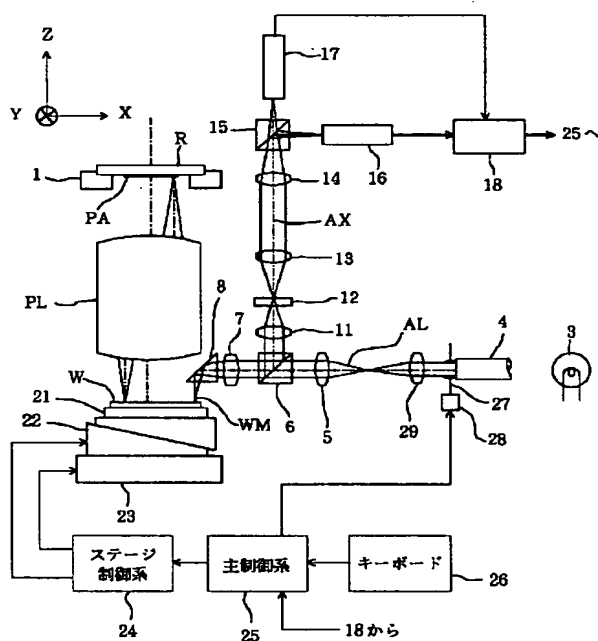
【図14】 重ね合わせ測定において、各フォーカス状態における主尺の像および副尺の像の光強度分布を示す図である。

【符号の説明】

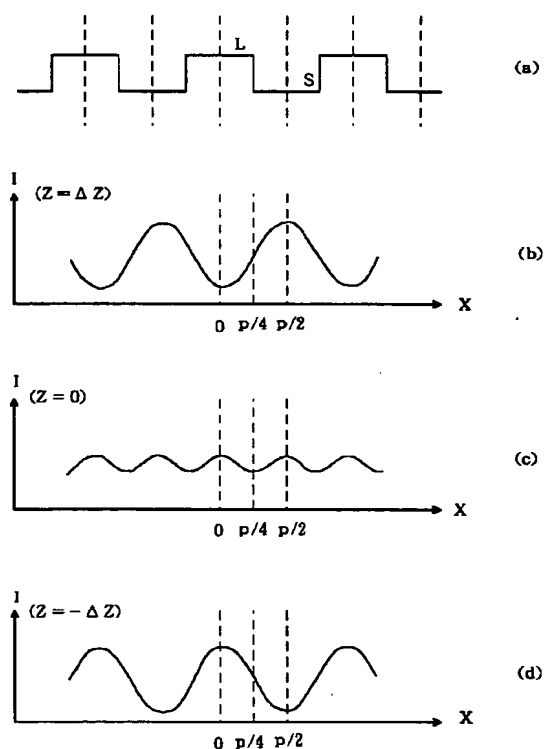
- 1 レチクルステージ
- 3 光源
- 4 ライトガイド
- 6 ハーフプリズム
- 7 第1対物レンズ
- 8 反射プリズム
- 11 第2対物レンズ
- 12 指標板

- 15 XY分岐ハーフプリズム
- 16、17 CCD
- 18 信号処理系
- 21 ウエハホルダ
- 22 Zステージ
- 23 XYステージ
- 24 ステージ制御系
- 25 主制御系
- 26 キーボード
- 27 照明開口状態規定手段
- 10 R レチクル
- PA パターン領域
- PL 投影光学系
- W ウエハ
- WM ウエハマーク

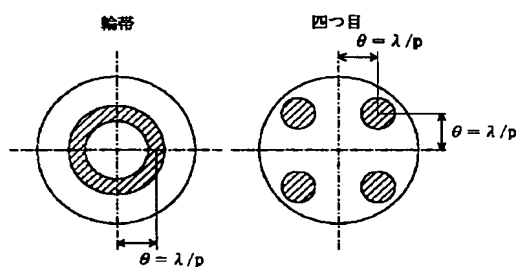
【図1】



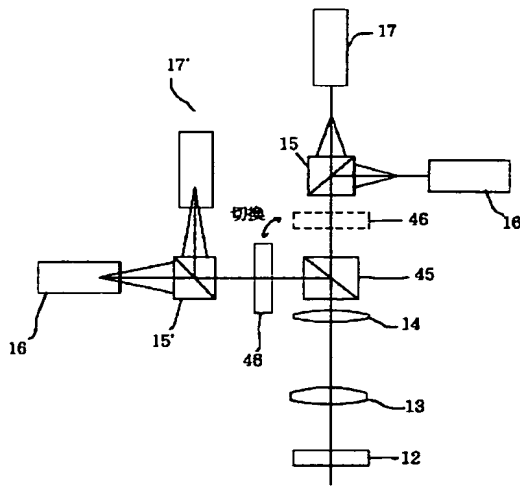
【図2】



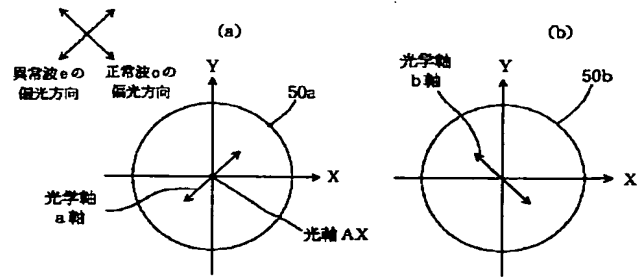
【図3】



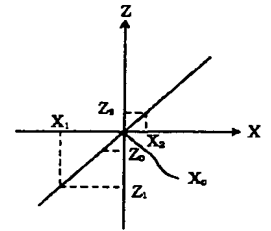
【図4】



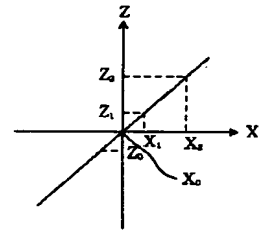
【図6】



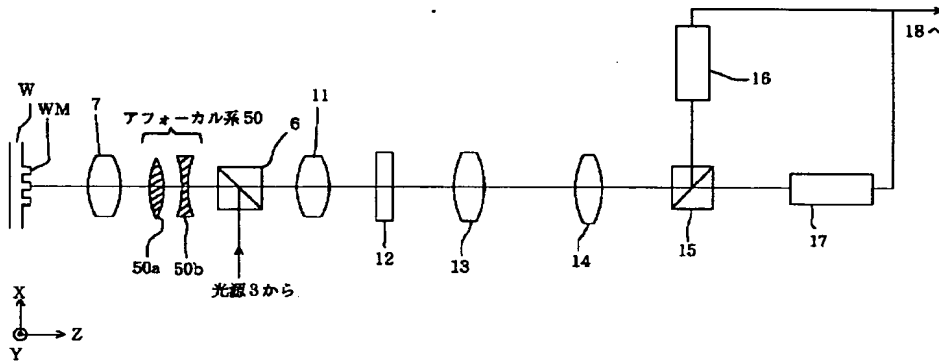
【図12】



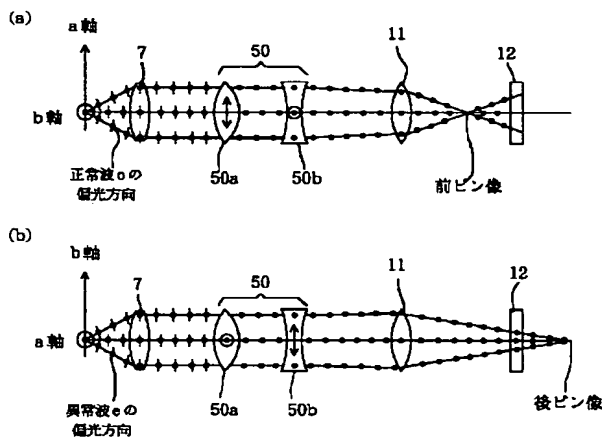
【図13】



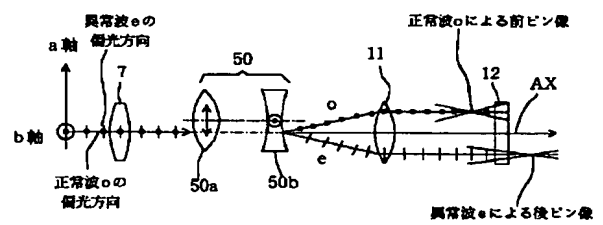
【図5】



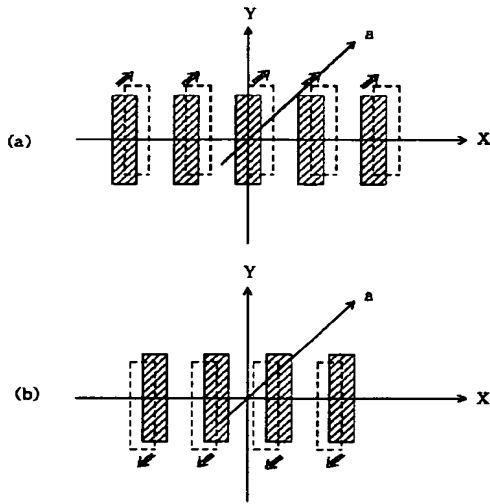
【図7】



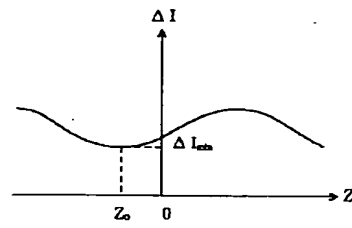
【図8】



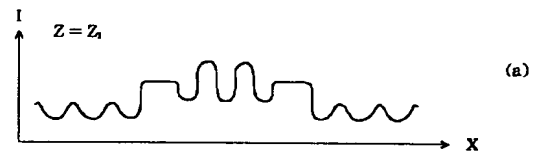
【図 9】



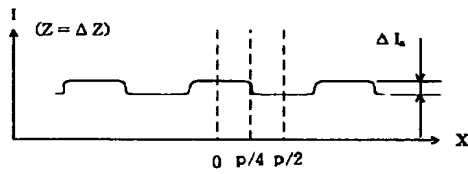
【図 10】



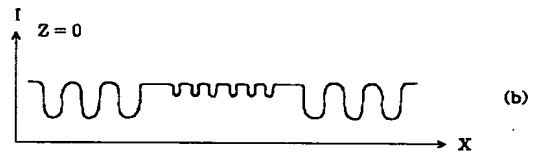
【図 14】



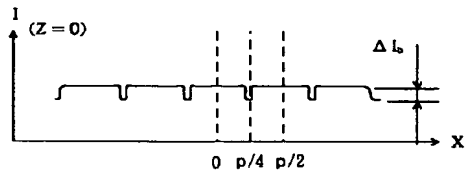
【図 11】



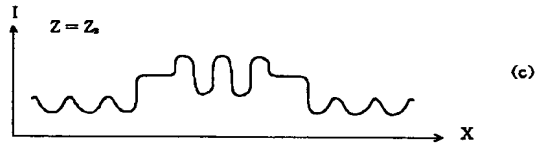
(a)



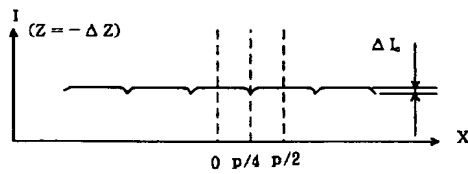
(b)



(b)



(c)



(c)